

# Aproximación de las imágenes hiperespectrales AHS a la cartografía de abundancias de matorral

M. Jiménez<sup>1</sup>, R. Díaz-Delgado<sup>2</sup>, R.C. Soriguer<sup>2</sup>, A. Fernández-Renau<sup>1</sup> y O. Gutiérrez de la Cámara<sup>1</sup>  
jimenezmm@inta.es

<sup>1</sup> Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial. Carretera de Ajalvir km. 4. Torrejón de Ardoz. 28850

<sup>2</sup> Estación Biológica de Doñana. CSIC. Avda. María Luisa s/n. Sevilla 41013

## RESUMEN

Las estrategias de conservación de flora en espacios naturales protegidos, requieren de un conocimiento del patrón espacial de la riqueza y abundancia relativa de sus comunidades vegetales. Este trabajo realiza una valoración preliminar de las imágenes del sensor hiperespectral aeroportado AHS para la cartografía de abundancia de especies vegetales, aplicándolo sobre las comunidades de matorral que tapizan las Arenas Estabilizadas de la Reserva Biológica de Doñana. Imágenes AHS en reflectancia ortorectificadas de un vuelo de septiembre de 2004, se han analizado frente a datos in-situ de las especies de matorral más significativas de este ecosistema, mediante un análisis de separabilidad y un análisis lineal de mezclas espectrales. Se ha obtenido una correlación de 0.43 ( $p < 0.05$ ) entre la cartografía de abundancias estimadas con AHS y las obtenidas en un muestreo estratificado, y valores de similitud, entre 0.6 y 0.8, en la comparación de "componentes puros" de matorral obtenidos directamente de las imágenes AHS y firmas espectrales medidas con espectrorradiómetros de campo.

**PALABRAS CLAVE:** AHS, cartografía de vegetación, matorral de Doñana, ALME, imágenes hiperespectrales aeroportadas.

## ABSTRACT

The richness and relative abundance spatial pattern of the vegetation communities is on demand for the flora conservation strategies of natural reserves. Here a preliminary issue of the capability of the Airborne Hyperspectral Scanner AHS for mapping vegetation species abundance is presented, assessing the shrublands communities that populate Stabilized Sands of Doñana Biological Reserve. The orthorectified ground reflectance images of a September 2004 AHS flight campaign, were analysed against field data of most representative shrub species, applying a separability analysis and a linear spectral unmixing. A correlation of 0.43 ( $P < 0.05$ ) was found between estimated AHS abundances and a field stratified samplings, and elevated similarity values of 0.6 and 0.8, in a comparison of AHS shrub endmembers and spectral signatures acquired with field spectroradiometers.

**KEY WORDS:** AHS, vegetation mapping, Doñana shrublands, SMA, airborne hyperspectral images.

## INTRODUCCIÓN

El estudio de la composición y la distribución espacial de las comunidades vegetales puede ayudar a mejorar el conocimiento de los efectos que los procesos ecológicos y las perturbaciones tienen sobre la diversidad biológica (Magurran, 2004). En el ecosistema de las Arenas Estabilizadas de la Reserva Biológica de Doñana (RBD), las comunidades de matorral suponen un hábitat fundamental para el desarrollo de la fauna, y requieren de un seguimiento de sus poblaciones (PND, 2002), al continuar siendo sometidas a perturbaciones como:

descenso prolongado del nivel freático, aclareos (Plan del Manejo del Lince), e incendios.

La cartografía de la distribución de especies vegetales mediante teledetección, puede suponer una alternativa a los métodos clásicos en zonas de difícil acceso y/o de gran extensión, su mayor impedimento reside en que la respuesta espectral de la vegetación, debida a las propiedades ópticas y estructura espacial de sus elementos (Asner, 1998), tiene una alta variabilidad (estacionalidad, estados de crecimiento, tipos de suelo) y una baja separabilidad entre especies. Los espectrómetros de imagen permiten abordar esta aplicación (Lewis, 2002), y la

experimentación mediante teledetección aeroportada, ha ido facilitando el control sobre dichas fuentes de variabilidad e ir obteniendo resultados esperanzadores como: en marisma con MIVIS (Silvestri, 2003), en matorral de zonas áridas con CASI (Lewis, 2002) y matorral mediterráneo con AVIRIS (Roberts, 1998). Los resultados de este tipo de cartografía son muy dependientes de: las características del espectrómetro, de los datos auxiliares y de la detectabilidad y discriminación de las especies. En este trabajo se presenta una primera estimación de la capacidad espacial, espectral y radiométrica del sensor aeroportado hiperespectral AHS, recientemente adquirido por el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA), para cartografiar la abundancia relativa de las especies más representativas del matorral de la RBD. Para esta aproximación se han utilizado las imágenes de un vuelo realizado en septiembre de 2004, donde el estado fenológico de las especies de matorral es muy similar.



**Figura 1.** Imagen NDVI del sensor AHS (21/09/2004) sobre el mapa de usos del suelo de Andalucía 1:50.000.

## EL PAISAJE DE LAS ARENAS ESTABILIZADAS

En la zona suroeste del Parque Nacional de Doñana (PND) se localiza la Reserva Biológica de Doñana (RBD), incluyendo en sus 6794 ha los tres ecosistemas representativos del parque: Marismas, Dunas Móviles y las Arenas Estabilizadas.

Las Arenas Estabilizadas, también llamadas “cotos”, ocupan la mayoría del territorio de la RBD,

y proceden de sucesivos frentes de dunas que la vegetación ha ido estabilizando a lo largo del tiempo, formando una zona de transición entre la recarga y descarga del acuífero Almonte-Marisma. Su vegetación actual se compone principalmente de restos de sabinar (*Juniperus phoenicea subs turbinata*), pinar de repoblación (*Pinus pinea*), algunos pastizales, pero sobre todo de un mosaico de tres comunidades de matorral (PND, 2002), cuyas especies más representativas se pueden ver en la Tabla 1.

|                         |  |
|-------------------------|--|
| <b>Monte Negro</b>      | <i>Cistus libanotis</i> , <i>Rosmarinus officinalis</i> , <i>Halimium commutatum</i> , <i>Lavandula stoechas</i> |
| <b>Monte Intermedio</b> | <i>Halimium halimifolium</i> , <i>Ulex australis</i> , <i>Stauracanthus genistoides</i>                          |
| <b>Monte Blanco</b>     | <i>Erica scoparia</i> , <i>Calluna vulgaris</i> , <i>Ulex minor</i> , <i>Erica ciliaris</i>                      |

**Tabla 1.** Especies más representativas de las tres comunidades de matorral de las Arenas Estabilizadas.

La distribución de las comunidades de matorral viene determinada, a todas las escalas, por las diferencias en la profundidad del nivel freático debido a la topografía dunar heredada por estos “cotos” (Muñoz-Reinoso, 2000). A escala regional se zonifica en dos grandes unidades, en la zona más alta, denominada *Las naves*, domina el matorral esclerófilo o “Monte Blanco”, llamado así por el aspecto blanquecino de las hojas de sus especies más abundantes, en la zona más baja, denominada *Manto Arrasado*, que tiene una mayor humedad edáfica, se desarrollan mejor los brezales constituyendo el “Monte Negro” por el tono “oscuro” predominante de sus hojas. Una mezcla de ambas comunidades y adaptada a condiciones xéricas variables, aparece el “Monte Intermedio”. A escala local, lo más destacable son los gradientes de presencia de especies y la mezcla de las tres comunidades en lugares de condiciones no extremas de humedad.

## DATOS HIPERESPECTRALES AHS

El espectrómetro de imagen AHS (Airborne Hyperspectral Scanner, *Imaging Group ArgonST*) es un sensor aeroportado tipo “line-scanner”, que registra 80 bandas desde el visible al infrarrojo térmico

dentro de las ventanas atmosféricas, y divide, tal como se puede ver en la Figura 2, la radiación incidente en 5 espectrómetros o “puertos” individuales.

El 21 de septiembre de 2004, el INTA realizó, para el Instituto Geológico y Minero de España (IGME), una campaña de teledetección aérea hiperespectral con el sensor AHS sobre el *Manto Eólico Litoral del Abalario-Doñana*. En esta campaña se registraron 6 líneas de vuelos con orientación NW-SE a 6,8 m de píxel y una repetición las dos pasadas centrales a 4,5m de píxel (Antón Pacheco, 2005).

### AHS Características Radiométricas

FOV: 90°  
IFOV: 2,5 mrad  
GIFOV: 2 ÷ 6 m  
Digitalización: 12 bits  
750 píxeles / línea  
Dos cuerpos negros  
para calibración  
canales térmicos



### Puerto AHS / Región / n° canales / $\Delta\lambda$

Puerto 1 VIS+NIR/442-1019 nm/20/30 nm  
Puerto 2a SWIR/1941-1650 nm/1/200 nm  
Puerto 2 SWIR/2091-2488 nm/42/13 nm  
Puerto 3 MWIR/3030-5410 nm/7/300 nm  
Puerto 4 LWIR/7950-13170 nm/10/400 nm

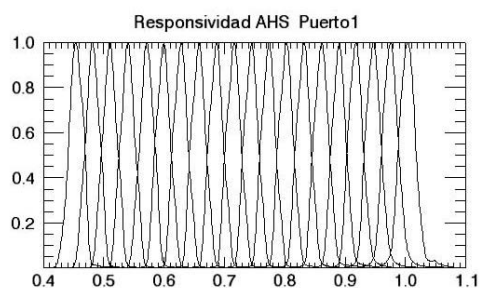


Figura 2. Características del sensor AHS.

### Preparación de las imágenes

En la Figura 1 se puede ver la orientación y cobertura de la pasada centrada en la RBD, a 4,5m de píxel, utilizada para realizar esta aproximación. De ella se ha trabajado únicamente con los canales

del puerto 1(ver Figura 2), y sus niveles digitales originales se calibraron a valores de radiancia “en el sensor” mediante coeficientes de calibración obtenidos en el *Servicio de Teledetección del INTA* utilizando la esfera integradora USS 4000 ([www.labsphere.com](http://www.labsphere.com)). La transformación a reflectancia “en el terreno” se ha realizado aplicando, en *ENVI* ([www.rsinc.com](http://www.rsinc.com)), el algoritmo “Empirical Line” con firmas espectrales de superficies homogéneas a escala de imagen y del espectrorradiómetro de campo GER 1500, de superficies “brillantes” (Ej: arena de duna) y “oscuras” (Ej: agua), tomadas en campañas de campo coincidentes con el vuelo AHS.

Los movimientos de la plataforma y del sensor AHS, durante la adquisición de las imágenes, introducen distorsiones geométricas sólo modelizables mediante el registro simultáneo de datos de orientación externa. Durante la campaña se registraron datos de posición (X, Y, Z) y de alabeo, cabeceo y azimut por el sistema inercial POS/AV 410 de *Applanix* ([www.applanix.com](http://www.applanix.com)), instalado a bordo de la plataforma aérea CASA 212-200, del INTA, (Rejas, 2005). Las imágenes se han ortorectificado mediante corrección paramétrica utilizando el software de geocodificación directa PARGE ([www.rese.ch](http://www.rese.ch)) y un modelo digital del terreno, proveniente de la rasterización de la altimetría digital del Mapa Topográfico de IGN a escala 1:25.000.

### DATOS DE CAMPO

Para realizar esta aproximación ha sido imprescindible disponer de datos de verdad terreno. Se ha contado con diversas fuentes de datos de campo y de datos auxiliares, incorporándolos todos a una base de datos georreferenciada en la misma proyección UTM 29 ED50 que las imágenes.

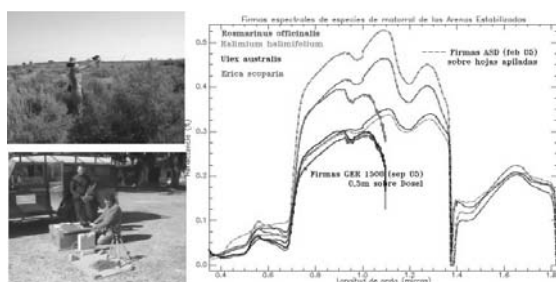
### Espectrorradiometría de campo

Signaturas espectrales de las especies más abundantes y representativas de las tres comunidades de matorral, que han servido como “componentes puros” en los análisis espectrales realizados a la imagen AHS, se tomaron en dos campañas de espectrorradiometría de campo con las siguientes características:

1. Coincidente al vuelo AHS se tomaron, con el GER 1500 ([www.ger.com](http://www.ger.com)) del *Servicio de Teledetección del INTA*, signaturas sobre dosel (distancia instrumento-planta de 1 m).

2. El 21 de febrero de 2005 y utilizando el ASD FieldSpec ([www.asdi.com](http://www.asdi.com)) del Laboratorio de SIG y Teledetección de la Estación Biológica de Doñana (EBD), firmas sobre hojas y ramas cortadas y apiladas en fondo controlado.

Todas las firmas espectrales fueron procesadas eliminando firmas erróneas, zonas de ruido, y generando medias y desviaciones estándar para cada especie. En la Figura 3 se muestran ejemplos de estas firmas de campo obtenidas, y fotos de la metodología de adquisición seguida.



**Figura 3.** Toma de “componentes puros” de matorral en campo sobre dosel y hojas apiladas.

### Cámara multispectral AMDC

Las imágenes de la Cámara Digital Multispectral Aeroportada (AMDC), adquiridas desde un segundo orificio en el CASA 212-200 simultáneamente al AHS, han servido para la localización de zonas homogéneas de vegetación y parcelas de muestreos. La AMDC es una cámara digital matricial con un array CCD (Charged Coupled Device) de 2024 x 2041 píxeles con un FOV de 36° y 5 bandas espectrales (3 en el visible, 1 infrarrojo y 1 pancromático). Se obtuvieron “frames”, cubriendo las pasadas AHS, de 1km x 1km con 1m de píxel, y un 60% de solape longitudinal. Cada “frame” se ortorectificó mediante *Ortho-Engine* ([www.pcigeomatics.com](http://www.pcigeomatics.com)) utilizando los mismos datos *Applanix* y mismo MDT aplicado al AHS.

### Muestreos de campo

Se llevaron a cabo dos tipos de muestreos de campo:

- A. La cobertura de las especies matorral y de suelo se muestreó en 16 parcelas de 50 x 50 m, estratificadas para recoger la mayor variabilidad, en composición florística, de la RBD. En cada parcela se realizaron 3 transectos de 30 x 1 m. Los límites de estas parcelas fueron georreferenciadas mediante GPS diferencial con corrección post-proceso (RMS=50cm).
- B. Con apoyo de cartografía e imágenes AMDC, se localizaron áreas homogéneas para cada tipo de vegetación: comunidades de matorral, sabinar, pinar, pastizal y herbazal. También se localizaron zonas de 3x3 píxeles (píxel de 4,5m) mono-específicas para extraer “componentes puros” de las imágenes de algunas de las especies más representativas del matorral: *E.scoparia*, *H.halimifolium*, *U.australis* y *R.officinalis*.

## METODOLOGÍA

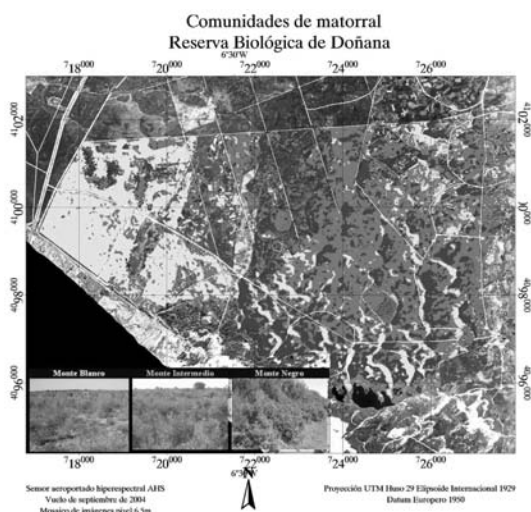
En esta valoración de la capacidad espectral, espacial y radiométrica del puerto 1 del AHS para cartografiar la abundancia de especies de matorral, se ha realizado, utilizando ENVI 4.0, un análisis de firmas espectrales y abundancia obtenidas de las imágenes, frente a las firmas y abundancias obtenidas en campo. Este análisis se ha aplicado sobre la zona de presencia del matorral y para ello previamente se han clasificado las formaciones vegetales, y se ha extraído el área ocupada por las comunidades de matorral.

### Área y distribución de las comunidades de matorral

Sobre un mosaico, realizado con las pasadas a 6.8m de píxel georreferenciadas, se extrajeron las áreas de entrenamiento de las superficies naturales y formaciones vegetales siguiendo la leyenda del *Mapa Ecológico de Doñana* (Montes, 1998) y localizadas en las campañas de campo: *lámina de agua*, *arenas*, *sabinar*, *pinar*, *juncal*, *pastizal*, *monte blanco*, *monte intermedio*, *monte negro*, y una última clase de “otros” para formaciones vegetales de poca representación en superficie: *Alcornoque*, *chopos* y *matorral noble*. Entre todas las clases la separabilidad espectral ha sido superior a 1.9 en el *índice de Jeffries-Matusita*. Se ha clasificado un nivel\_1 mediante *Máxima Probabilidad* con una clase unificada de matorral, y sobre ésta un nivel\_2 mediante *Spectral Angle Mapper (SAM)*, que al ser menos sensible al albedo provee-



niente del suelo, diferencia mejor las tres comunidades de matorral con grados de cobertura diferentes y característicos como se puede ver en la Figura 4. También en la Figura 4 se muestran las zonas de ocupación de cada clases de matorral y sobre la que se va a aplicar el análisis de mezclas espectrales.



\*Figura 4. Distribución de las comunidades de matorral en las Arenas Estabilizadas sobre el mosaico AHS a 6,8 m de píxel.

### Análisis lineal de mezclas espectrales

Sobre las zonas de matorral de la pasada a 4,5m de píxel centrada en la RBD, se ha aplicado un Análisis Lineal de Mezclas Espectrales (ALME) con constricción a 1 y con los “componentes puros”, provenientes de las firmas espectrales procesadas GER 1500, correspondientes a: especies de matorral, hojarasca o materia vegetal seca y arena de duna, no introduciendo una signatura de *sombra*, a falta de un análisis de sensibilidad de este componente.

La salida del ALME es una imagen, por cada “componente puro”, con la fracción de abundancia de esa especie en cada píxel, más una imagen de error asociado que estima la representatividad de los componentes elegidos, siendo en este caso aplicado un error por debajo del límite RMS <0.025, estimado por Roberts (1998) en su trabajo del matorral mediterráneo.

Sobre las imágenes de los “componentes puros” de las especies *E.scoparia* y *H.halimifolium*, se han superpuesto los vectores de las parcelas muestreadas en campo, y se han cruzado las abundancias obtenidas en ambos casos.

### Análisis de separabilidad

Para comprobar la separación estadística a nivel “intra” e “inter” comunidades, se han aplicado test estadísticos: U de Mann-Withney y T-test, sobre las signaturas espectrales tomadas con el espectroradiómetro GER 1500.

De los píxeles con mayor abundancia de las especies *E.scoparia* y *H.halimifolium* detectados en el ALME y que a su vez habían sido validados en campo, se ha extraído de la imagen AHS el “componente puro” para calcular su separabilidad, mediante el algoritmo de similitud entre 0 y 1 *Spectral Feature Fitting* (SFF) en ENVI, con respecto a las signaturas espectrales de esas mismas especies adquiridas en campo.

## RESULTADOS

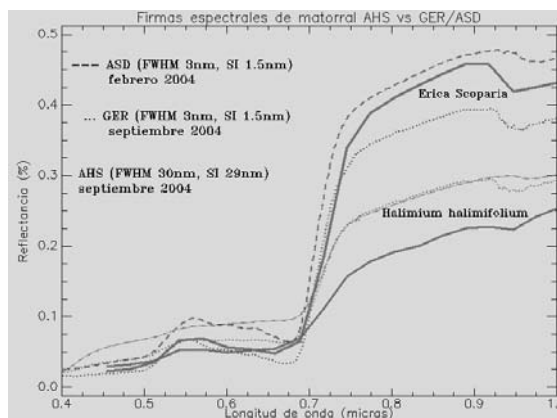
El error geométrico medio obtenido mediante la corrección paramétrica y los datos auxiliares, ha sido de 2 píxeles para ambas resoluciones espaciales.

La clasificación de formaciones vegetales obtenida se ha cruzado con localizaciones de verdad terreno obteniendo un coeficiente *Kappa* de 0.77.

Las abundancias estimadas de *E.scoparia* y *H.halimifolium* por el análisis de mezclas muestran un coeficiente de correlación de 0,43 ( $p < 0.05$ ) frente a las abundancias de estas especies muestreadas en campo.

Los tests aplicados sobre las firmas de campo no diferencian estadísticamente a estas especies provenientes de comunidades distintas ( $p > 0.05$ ), y aunque los análisis de separabilidad muestran valores del índice de similitud SFF bajos a nivel “intra”-comunidad (<0,5) se obtienen valores altos “entre”-comunidades (>0,7).

La Figura 5 muestra la superposición de los “componentes puros” de campo y AHS, manteniendo sus respectivas resoluciones espectrales, para las especies *E.scoparia* y *H.halimifolium*.



**Figura 5.** Comparación de firmas espectrales de especies de matorral, GER1500 y ASD versus AHS.

## CONCLUSIONES

En la aproximación realizada, las imágenes AHS han mostrado una capacidad discriminatoria, de las distintas especies de matorral, suficiente para profundizar en una valoración de este sensor para la cartografía de abundancia relativa y riqueza de comunidades vegetales, teniendo en cuenta que el empleo de imágenes SWIR e IR-térmico, donde el AHS también registra, permitirá aumentar esta capacidad.

A falta de un análisis con distintas fechas que pueda suponer un aumento de la discriminación, la imagen de septiembre con sus correspondientes “componentes puros”, adquiridos en el momento del vuelo, se ve como opción suficiente, al estar todas las especies en un momento fenológico similar. La mayor fuente de variabilidad, por ello, puede provenir de las variaciones en el Índice de Área Foliar (LAI) y de los distintos estados de crecimiento y perturbación (pastoreo), sobre todo en las especies de Monte Blanco y Monte Intermedio que son de arquitectura más ahuecada y más dependientes de los ángulos de iluminación y de observación, aspectos a incluir en la futura valoración.

La resolución espacial empleada muestra un equilibrio adecuado entre la discriminación de especies y la operatividad del volumen de datos, si bien un estudio comparativo entre las resoluciones posibles se ve necesario.

## AGRADECIMIENTOS

Antonio Pou (Dpt. Ecología de la U.A.M.) por la dirección de la Tesis donde se engloba este trabajo, a Carmen Antón-Pacheco (IGME) por la cesión de las imágenes, y a Christian Kiffner (Universidad de Gotingen) y Simón Fraser y Didier Fent (Universidad de Munich) por su ayuda en los trabajos de campo.

## BIBLIOGRAFÍA

- ANTÓN-PACHECO, C. et al. 2005. Contribución al estudio de los humedales del MEL a partir de imágenes AHS. *XI Congreso Nacional de Teledetección*. pp. 437-442.
- ASNER, G.P. 1998. Biophysical and Biochemical Sources of Variability in Canopy Reflectance. *Remote. Sens. Env.* 64:234-253.
- LEWIS, M. 2002. Spectral characterization of Australian arid zone plants. *Can. J. Remote Sensing*. 28(2): 219-230.
- MAGURRAN, A.E. 2004. *Measuring biological diversity*. Blackwell. 250 pp.
- MONTES, C., BORJA, F., BRAVO, M.A. y MOREIRA, J.M. 1998. *Reconocimiento Biofísico de Espacios Naturales Protegidos*. Doñana. Consejería de Medio Ambiente, Junta de Andalucía. 311 pp.
- MUÑOZ-REINOSO, J.C., GARCÍA NOVO, F. 2000. Vegetation patterns on the stabilized sands of Doñana Biological Reserv. *Proceedings IAVS Symposium*, pp. 162-165.
- PND. 2002. *Parque Nacional de Doñana*. Esfagnos. 430 p.
- REJAS, J.G, PRADO, E. DE MIGUEL, E. 2004. Caracterización del sensor Hiperespectral AHS para la georreferenciación directa de imágenes a partir de un sistema inercial GPS / IMU. *6ª Semana de Geomática*. Barcelona.
- ROBERTS, D.A., et al. 1998. Mapping Chaparral in the Santa Monica Mountains using Multiple Endmember. *Remote Sens Env.* 65:267-279.
- SILVESTRI, S., MARANI, M., MARANI, A. 2003. Hyperespectral Remote Sensing of Salt marsh vegetation, morphology and topography. *Physics and Chemistry of the Earth*. 28:15-25.